

전류제어형 PWM컨버터를 이용한 동기발전기용 여자시스템에 관한연구

A Study on Excitation System for Synchronous Generator using Current Mode Controlled PWM Converter

장수진*, 류동균*, 서민성*, 김준호*, 월충연*, 배기훈**

(Su-Jin Jang* · Dong-Kyun Ryu* · Min-Sung Seo* · Jun-Ho Kim* · Chung-Yuen Won* · Kee-Hun Bae**)

ABSTRACT

The output voltage of Synchronous Generator is regulated constantly by field current control in excitation system. A synchronous generator is equipped with an automatic voltage regulator(AVR), which is responsible for keeping the constant output voltage under normal operating conditions about various levels. High frequency PWM converter (Current Mode Control Buck converter) type excitation system for synchronous generator is able to sustain output voltage level properly when the fault condition happened.

This paper deals with the design and evaluation of the excitation system controller for a synchronous generator to improve the steady state and transient stability. The simulation and experimental results show that the proposed excitation system is improve the respons time by the AVR(automatic voltage regulator) of 50kW synchronous generator that is applied the current mode control excitation system.

1.서론

수 백kW급 건물의 비상용 전원, 군사용 전원 및 낙도용 전원으로 사용되는 비상용 발전기의 안정적인 전력의 공급은 엔진이나 동기발전기의 제어장치 성능에 의존한다.

선진 외국의 경우 전력수요의 증가로 피크부하에서 병렬운전시 부하 분담, 부하 추종성, 고품질의 전력공급에 따른 속응성, 고신뢰성 제어시스템의 필요성에 따라 디지털방식 제어로 전환되고 있다[1].

전력산업의 발달과 더불어 전력장비의 신뢰성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 하지만 기존에 적용되고 있는 발전기 AVR(auto voltage regulator)은 여자전원이 TCR(thyristor control rectifier)방식으로 제어되어 실제 산업현장에 적용시 다양한 문제를 야기할 수 있다 [1],[2].

첫째, 다양한 정류부하가 발전기 출력에 연결되어 발전기 출력 전압의 왜곡을 초래한다. 이로 인하여 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정할 수 없어 오동작의 원인이 되기도 하고 정밀한 출력 전압 제어를 할 수 없다.

둘째, 발전기 출력 전압을 빠르게 제어하려면 AVR의 속응성이 좋아야한다. 그러나 일반적인 TCR 방식의

여자 전원 제어는 입력이 3상일 경우 최대 180[Hz]의 제어주기를 가질 수 있어 빠른 응답 특성을 얻기가 어렵다.

셋째, 현재의 AVR의 발전 추세를 보면 발전기의 원격 감시, 고속응답 제어등을 요구하고 있는데 기존의 아날로그 AVR은 또 다른 데이터 획득 시스템을 추가해야 하는 문제점을 가지고 있다.

최근 DVR(digital voltage regulator)이 국산화 되어 발전기에 적용되고 있지만 대용량 발전기에 국한되고 있는 실정이다.

따라서 비상용 전원, 군사용 전원, 낙도용 전원에 안정적인 전력 공급을 위한 저렴하고 성능이 우수한 DVR의 국산화 연구가 진행되고 있다[2].

본 연구에서는 부하 변동에 의한 발전기 단자 전압 변화에 따른 속응성이 우수한 여자기 제어를 위해 전류 제어형 Buck 컨버터 형태의 고주파 PWM 컨버터를 제안하였다.

또한 시스템에 대한 타당성과 응답특성을 검증하기 위해 회로해석 프로그램(Psim)을 이용한 시뮬레이션과 50kW급 비상용 동기발전기를 대상으로 제안한 시스템을 제작, 적용하여 실험을 통한 타당성을 검증하였다.

2. 동기발전기의 여자시스템

동기발전기 여자시스템에 의한 제어 기능에는 전압 제어, 무효전력 제어, 계통 안정도 향상등을 포함하고 있다. 또한 보호 기능에는 동기발전기, 여자시스템과 타 설비들이 그들 자신의 능력 한계를 벗어나지 않도록 보호하는 기능을 포함하고 있다.

그림 1은 동기발전기 제어시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 그림 1의 구성도에서 확인할 수 있듯이 발전기의 제어시스템에서 AVR은 다양한 제어기능과 보호기능을 포함하고 있다.

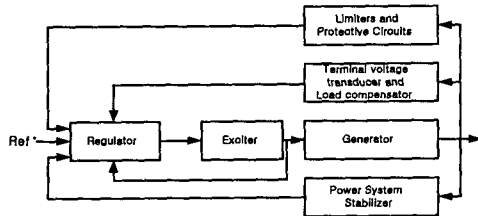


그림 1. 동기발전기 제어시스템 구성도
Fig 1. Block diagram of Synchronous Generator Control System

교류발전기가 최초 출현하였을 때 여자시스템에 대한 전원 공급 장치로 직류발전기가 사용되었다. 하지만 정류장치 및 브러쉬 장치가 필요하게 되었고, 이들 장치를 사용함에 따라 마찰에 의한 불꽃 발생, 마모로 인한 보수 및 교체가 필요했다.

그후 발전기의 여자시스템은 정지형 여자시스템과 교류 여자시스템으로 발전하였다[1].

정지형 여자시스템은 주발전기의 출력 전압을 이용하여 여자전원으로 공급하는 방식으로 다이리스터 정류기의 점화각을 제어함으로써 계자권선에 직류전류를 인가하는 방식이다. 그림 2는 정지형여자시스템의 한 형태인 다이리스터 직접 여자시스템을 나타내고 있다.

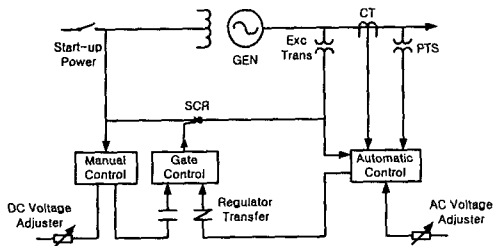


그림 2. 다이리스터 직접 여자시스템
Fig 2. Potential source Controlled Rectifier Exciter

이 방식은 구성이 간단하다는 점과 여자가 없애 시 지연을 제거할 수 있는 장점이 있지만 발전기의 출력 전압을 여자기 전원으로 공급하기 때문에 출력단의 다

양한 사고에 직접적인 영향을 받는 단점이 있다[2].

교류여자시스템은 여자기 출력 제어방법, 여자기 전원 공급 방법, 그리고 정류기의 배치위치등에 따라 여러 가지 형태로 분류될 수 있다. 그림 3은 교류여자시스템의 한 형태인 브러쉬리스형 교류여자 방식을 나타내고 있다.

회전 전기자형 교류발전기를 주발전기 회전축에 직결하고 교류발전기의 출력을 같은 회전축에 부착된 정류기를 통해 주발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하는 방식이다.

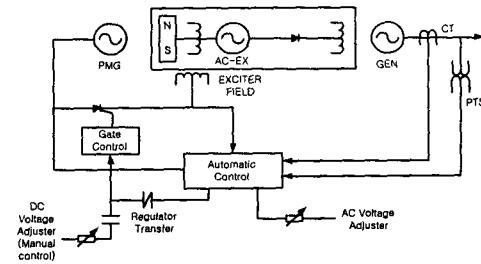


그림 3. 브러쉬리스형 교류여자시스템
Fig 3. Alternator-Rectifier Exciter Employing Rotating Non controlled Rectifiers(Brushless)

이 방식은 고장시 보수에 대한 어려움이 있고 같은 축상에 직결되어 있기 때문에 축이 길어지는 단점이 있다. 하지만 정지형 여자시스템과 달리 독립된 전원 확보로 안정된 여자전원을 공급할 수 있는 장점이 있어 비상용 동기발전기 여자시스템에 널리 적용되고 있다[3],[4],[5].

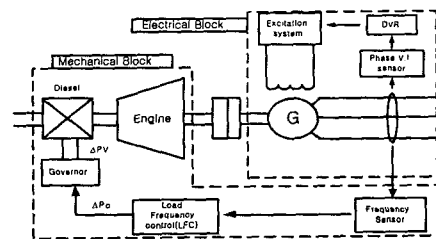


그림 4. 동기발전기 구성도
Fig 4. Block Diagram of Synchronous Generator

그림 4는 본 논문에서 제안한 전압/전류 제어 모드 Buck 컨버터 여자시스템을 적용한 비상용 동기발전기의 구성도이며, 기계 계통은 토크를 발생시키는 엔진 부분, 주파수를 측정하는 주파수 측정장치, 그리고 엔진의 정속도를 유지하기 위한 Governor로 구성되어 있다.

전기계통부분은 유기기전력이 발생하는 Alternator 부분과 출력 전압을 제어신호로 바꾸어주는 전압·전류

측정장치, 정전압 및 무효전력 부분을 제어하기 위한 DVR로 구성되어 있다.

이와 같이 각각의 기계 계통과 전기 계통에서 제어와 보호기능을 담당하고 있지만 발전기 여자시스템의 기본 기능이라 함은 발전기의 계자권선에 직류 전류를 공급하는 기능으로서 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스런 성능 구현에 필수적인 보호 기능과 제어기능을 수행하는 것이다[6].

하지만 기존 여자시스템인 정지형여자시스템과 교류여자시스템 제어방식에서는 TCR제어 방식을 주로 적용하였기 때문에 서론에서 제시하였던 문제점인 발전기 출력 전압의 왜곡으로 인한 제어각 설정 어려움, 180Hz의 제어주기로 인한 빠른 속응성 확보의 어려움등이 발생할 수 있다[2].

이러한 TCR제어 방식의 대안으로 본 연구에서는 Buck 컨버터를 적용한 여자시스템을 제안하였다. 본 여자시스템 DVR의 주 전력소자는 MOSFET를 사용하여 구성하였고 제어 방법은 PWM(pulse width Modulation)제어에 의하여 발전기의 출력 전압을 조정한다.

제안된 PWM 컨버터는 전압 제어형과 전류 제어형 두 타입의 컨버터로 적용하였으며 또한 기존 아날로그 방식인 TCR 제어방식을 발전기에 적용하여 제어특성 및 응답 특성을 비교하였다.

안정적인 발전기 출력 전압과 PWM 신호를 디지털 제어하기 위하여 마이크로 프로세서를 사용하였다.

그림 5는 여자시스템에 적용된 전압제어형 Buck 컨버터와 발전기구조를 나타내고 있다. DVR은 Buck 컨버터와 마이크로 프로세서, 게이트 드라이브, 및 센서등으로 구성되어진다.

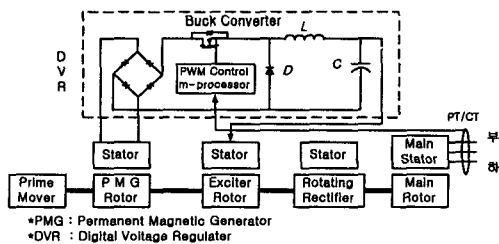


그림 5. Buck 컨버터 여자시스템
Fig 5. Buck converter Excitation system

그림 6은 동기발전기 내부 및 여자기 구조를 나타내고 있으며, DVR 내부의 제어 블록도를 보여주고 있다. 논문에 적용된 비상용 동기발전기는 타여자식 브러쉬리스형 동기발전기로서 브러쉬리스형 동기발전기용 컨버터는 PMG에서 입력전원을 받는다.

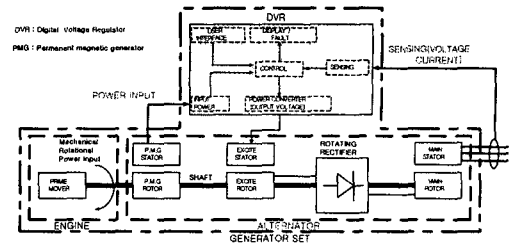


그림 6. 브러쉬리스형 동기발전기 여자시스템 구성도
Fig 6. Diagram of Brushless Synchronous generator Excitation system

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션

본 논문에서는 TCR 제어 방식의 문제점을 보완하고 계자강화능력을 향상시키기 위한 전압/전류제어 방식의 Buck컨버터를 시뮬레이션을 통해 TCR 제어 방식과 비교하였다.

여자시스템의 응답 특성을 보기 위하여 PSIM으로 시뮬레이션 하였다. 전압제어형과 전류제어형 Buck 컨버터 여자시스템의 기본 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 여자시스템 정격 파라미터(전압제어형)
Table 1. Design parameters of Excitation System (voltage mode control)

| 파라미터 | 정격 |
|------------------|-------------|
| PMG 출력주파수 | 250~300[Hz] |
| PMG 출력 전압 | 180~240[V] |
| 제안된 Buck컨버터인덕턴스 | 3.1[mH] |
| 제안된 Buck컨버터커패시턴스 | 940[μF] |
| 계자저항 | 18~20[Ω] |
| 계자인덕턴스 | 800[mH] |
| 스위칭주파수 | 100[kHz] |

시뮬레이션에서의 발전기 출력 전압의 변동은 V_{ref} 변동으로 가정하였고, 안정적인 출력 전압을 위한 계자전류 제어는 응답 시간을 기준으로 각각 비교하였다.

그림 7은 기존 TCR 제어 방식 시뮬레이션 회로도이다. 시뮬레이션 회로도에 나타나 있는 전기자는 전기적으로 아무런 영향이 없다.

그림 7의 TCR 제어 방식은 다이리스터의 점호각제어

에 의해 발전기의 계자권선에 직류 전류를 공급하는 방식이다.

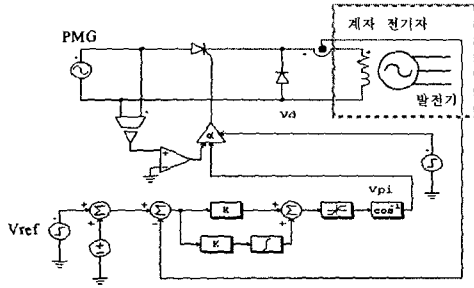


그림 7. TCR 제어방식
Fig 7. TCR control Type

또한 TCR 제어방식의 입력 전압과 입력 주파수, 그리고 계자권선의 저항값과 인덕턴스값은 Buck 컨버터 여자시스템의 정격 파라미터인 f_{PI} 과 같다. 그리고 여자기의 계자권선은 R-L회로로 등가화 하였다.

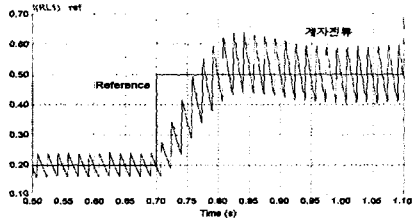


그림 8. TCR 제어방식 계자전류 파형
Fig 8. Field current waveform of TCR Type
(0.1A/div , 50ms/div)

V_{ref} 변동시 TCR 제어방식의 계자전류는 0.2[A]에서 0.5[A]로 증가하는데 응답 시간이 약 0.25[s] 걸림을 확인할 수 있었다. 그리고 계자 전류의 리플이 최대 0.2[A]임을 확인할 수 있다.

그림 9는 TCR 제어 방식의 문제점을 개선하고자 고주파 PWM 컨버터인 Buck 컨버터를 적용한 여자시스템 시뮬레이션 회로도도를 나타내고 있다. 전압 제어형 Buck 컨버터 또한 발전기 출력전압의 변동은 V_{ref} 변동으로 가정하였다.

그림 9의 시뮬레이션 회로에서 계자권선을 R-L회로로 등가화 하였으며, 그림 10의 파형은 그림 9의 V_{ref} 변동시 계자전류 파형을 나타내고 있다.

V_{ref} 변동시 안정된 발전기의 출력 전압 제어를 위한 계자전류는 TCR 제어 방식보다 빠른 약 0.18[s]의 응답 시간을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 TCR 방식과 비교해서 리플성분이 확연히 감소 했음을 나타내고 있다.

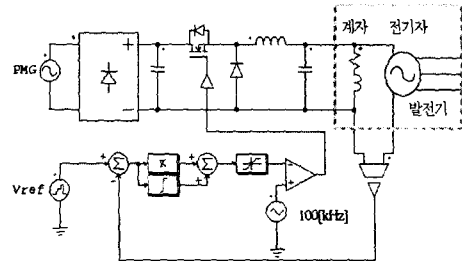


그림 9. 여자시스템용 Buck 컨버터
Fig 9. Voltage mode controlled Buck converter for Excitation System

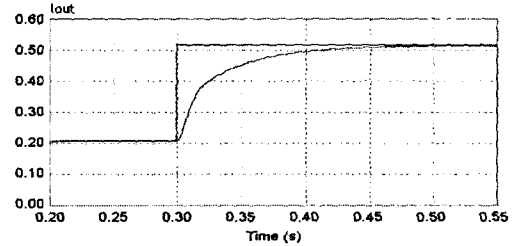


그림 10. 전압제어 Buck 컨버터 계자전류 파형
Fig 10. Field current waveform of Voltage mode control Buck converter
(0.1A/div , 50ms/div)

논문에서는 동기발전기 여자시스템에 LC필터를 제거한 전류제어형 Buck 컨버터를 적용하고자 한다. 전류제어형의 특징은 다음과 같다.

- i) 계자권선의 인덕턴스가 약 800[mH] 이므로 Buck 컨버터의 LC 필터를 제거 하여도 계자 권선 자체가 필터 역할을 수행할 수 있다.
- ii) 전류제어형 Buck 컨버터를 설계함으로써 인덕터를 사용하지 않았기 때문에 스위칭 주파수를 100[kHz]에서 2.5[kHz]로 낮추었다. 이로인해 스위칭소자의 스트레스를 줄일 수 있다.
- iii) 계자 권선의 잔류 자속으로 인한 역기전력 발생시 LC필터의 커패시터 파괴를 방지하기 위해 다이오드를 설치하여야 하지만 전류제어형은 설치할 필요가 없다.

위와 같은 이유로 전체적인 부품의 감소가 가능하여 제작비를 줄일 수 있으며, 소형화를 가능 하게 한다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 전류제어형 여자시스템의 시뮬레이션 회로도도를 나타내고 있다. 전체적인 시뮬레이션 조건은 전압 제어형 여자시스템과 같지만 전류제어형 여자시스템의 시뮬레이션 회로도에서는 LC필터를 제거 하였다.

그림 12는 전류제어형 Buck 컨버터의 계자 전류 파형을 나타내고 있다.

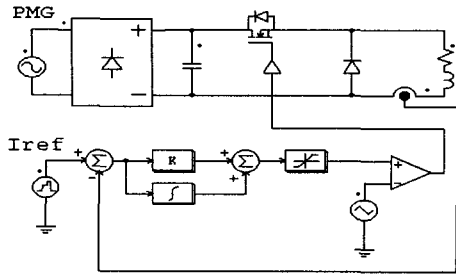


그림 11. 여자시스템용 Buck컨버터(전류제어형)
Fig 11. Current mode controlled Buck converter for Excitation system

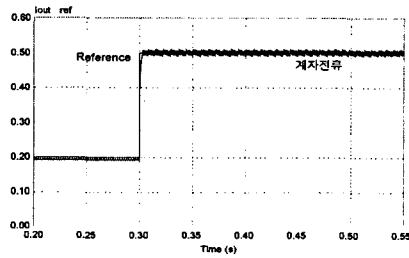


그림 12. 전류제어 Buck 컨버터 계자전류 파형
Fig 12. Field current waveform of Current mode controlled Buck converter (0.1A/div , 50ms/div)

전류제어형 Buck 컨버터의 응답특성은 TCR 제어방식 및 전압제어형 Buck 컨버터 방식과 비교했을 때 가장 속응성이 우수한 응답특성을 보여 주고 있다. 하지만 전압 제어형에 비해 리플성분이 다소 증가했음을 알 수 있다.

시뮬레이션에서 Buck 컨버터를 여자시스템에 적용하여 계자전류를 제어함으로써 동기발전기 여자시스템에 대한 응답 특성을 크게 개선할 수 있다.

3.2 실험 결과

그림 13의 두 파형은 50kW급 비상용 동기발전기에 기존 아날로그 TCR 제어방식의 AVR과 PWM 컨버터인 Buck 컨버터를 적용하였을 때 무부하에서 6kW 부하 변동시 제어되는 계자전류 파형을 나타내고 있다.

전압제어형 Buck 컨버터의 경우 약 0.2[s], TCR 제어 방식인 경우 약 0.5[s]의 응답 시간을 확인할 수 있다.

그림 14의 파형은 12kW에서 16kW 부하 변동시 계자전류 파형을 나타내고 있다.

그림 15의 파형은 본 논문에서 제안한 전류제어형 Buck converter에 의해 제어되는 계자전류 파형을 나타내고 있다. 파형 (a)는 약0.2[s], (b)의 파형은 전압제어

형 보다 빠른 약 0.4[s]의 응답 시간을 가짐을 확인할 수 있다.

TCR 제어 방식 전압제어 Buck 컨버터 방식

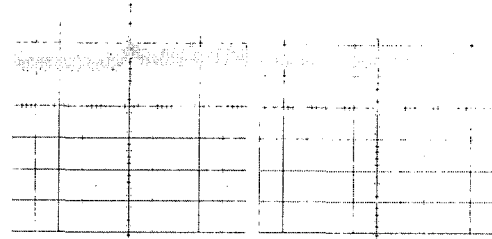


그림 13. 무부하→6kW 부하 변동시 계자전류
Fig 13. Field current waveform at No-load→6kW load changes (200mA/div , 0.5s/div)

TCR 제어 방식 전압제어 Buck 컨버터 방식

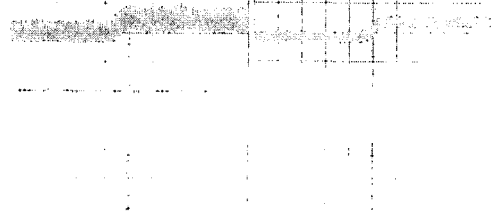
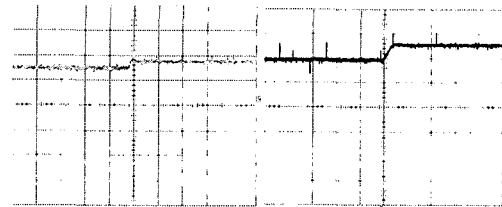


그림 14. 12kW→18kW 부하 변동시 계자전류 파형
Fig 14. Field current waveform at 12kW→18kW load changes (200mA/div , 0.5s/div)



(a) (b)
그림 15. Buck컨버터방식 계자전류파형 (전류제어형 컨버터)
Fig 15. Field current waveform of Current controlled mode Buck converter (200mA/div , 0.5s/div)
(a) No-load→6kW (b) 12[kW]→18[kW]

이 처럼 각각의 파형에서 확인할 수 있듯이 Buck 컨버터 제어방식이 TCR 제어방식 보다 응답속도가 빠르고, 계자전류 자체의 리플성분도 감소 했음을 실험을 통해 확인할 수 있다.

또한 3가지 방식중 전류제어형 방식이 응답시간과 전체적인 회로 구성면에서 가장 좋은 특성을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. 결론

기존의 아날로그 TCR 제어 방식은 발전기 전압을 왜곡시키는 부하가 연결될 때 다이리스터의 제어각을 정확하게 결정할수 없어 발전기 출력전압을 신속하게 제어할 수 없고, 또한 오동작의 원인이 되기도 한다.

본 논문에서는 TCR 방식에 대한 문제점을 개선하기 위하여 DC-DC 컨버터인 고주파 PWM Buck 컨버터를 발전기의 여자시스템에 적용하여 빠른 응답특성을 가지도록 설계하였다.

디지털 제어와 속응성이 우수한 발전기 출력 전압 제어가 가능함을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

본 연구에서는 고주파 PWM 컨버터로 디지털 DVR을 구현하여 부하변동에 속응성있는 계자전류제어와 정교한 발전기 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1)원충연, 안정호, "동기발전기용 여자기 전원장치 및 디지털 전압제어 동향", 조명·전기설비학회지 기술해석, pp.51-57, 2002.
- (2)정창용, "Chopper형 디지털 AVR", 99년 기술이전품목,한국전기연구소, 1999.
- (3)류홍우, "동기발전기용 승강압 초파식 정지형 여자시스템에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 논문, 1996.
- (4)임익현, "동기발전기 디지털 여자 시스템 개발에 관한 연구", 홍익대학교 대학원 공학박사 논문, 2001.
- (5)"An american national standard IEEE standard definitions Excitation Systems for Synchronous Machines", pp.8-14, 1986.
- (6)서민성과5인, "동기발전기용 디지털 여자시스템 고성능제어", 전력전자학술대회논문집, pp.763, 2002.

◇ 부 록 ◇

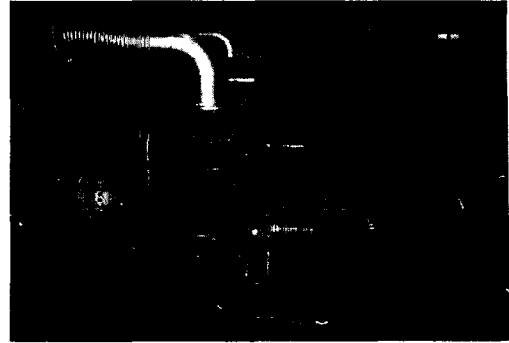


그림 16. 50(kW) 동기 발전기
Fig 16. 50(kW) Synchronous generator

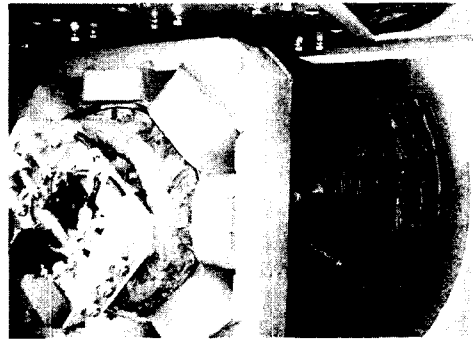


그림 17. 보조발전기와 주발전기
Fig 17. Pilot generator and Main generator